Vol.40 No.10 Oct. 2020

面向电力物联网信息感知的低压电力线与 微功率无线通信融合方法

史建超,谢志远

(华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003)

摘要:为提高电力物联网信息感知层面的覆盖范围和可靠性,提出一种构建低压电力线与微功率无线通信 跨层融合网络(CPW)的方法。首先建立CPW的统一介质访问控制(MAC)层模型,为实现CPW 网络层的融 合提供基础支持;然后提出一种结合布朗运动与局部收敛次数控制的改进蚁群算法,完成了CPW 的组网 过程;对CPW 的子业务流进行分配,并提出业务分配中的误码率需求因子,实现了低压电力线与微功率无 线通信网络的跨层融合。仿真结果表明,该跨层融合网络的通信链路服务质量优于电力线与无线双模或 级联通信网络,用户可以根据不同业务设置相应的误码率需求因子,以兼顾通信链路质量与网络负载均 衡,保障 CPW 的高效性和可靠性。

0 引言

电力物联网是物联网技术在智能电网中的应 用,建设广泛互联的电力物联网,并将其与坚强智能 电网进行深度融合,是实现未来能源互联网融合的 重要举措^[1]。电力网覆盖了海量的电力设备、家用 电器等与电力相关的实体,电力物联网可以实现各 种电力设备及电力用户的状态信息全面感知、信息 与数据互联共享,进而有效地提高电网运营效率以 及用户体验水平。电力物联网赋予了传统电网数字 化、智能化、网络化的特征,通过开放互联的网络平 台,不断引领其他领域的先进技术与设备融合其中, 这必然会产生一系列广泛而深刻的经济效益和社会 效益。

电力物联网建设的基本保障因素是信息的全面 感知与互联^[2],为了传输大量传感器与电力设施的 数据信息,电力物联网应该具备广阔的覆盖范围、高 效的传输效率、可靠的通信质量保障等特点,单靠某 一种通信方式很难完成广泛互联的网络建设。因 此,面向电力物联网信息感知层面的多种通信方式 融合技术的研究,对保障电力物联网的稳定可持续 发展具有重要意义。

电力线通信 PLC(Power Line Communication) 的覆盖范围十分广阔,但是电力线网络环境的复杂 性制约了其通信质量^[3-4];无线通信的可扩展性较

收稿日期:2020-04-05;修回日期:2020-07-27

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2019502186);河 北省科技计划项目(17211704D)

Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (E2019502186) and the Science and Technology Planning Project(17211704D) 好、灵活性高,但是无线通信环境中的建筑物遮挡等 因素会对其通信质量造成严重的影响^[5]。电力线通 信技术与无线通信技术可以实现优势互补[67],这2 种通信方式的紧密结合有利于保障网络的高覆盖性 和可靠性。电力线通信与无线通信的传输媒介不 同,信号频率的差异较大[8-9],所以两者在物理层难 以实现融合。目前有一些探索电力线通信与无线通 信融合方法的研究,例如:文献[10]讨论了电力线与 无线混合通信系统相对非混合系统在技术与基础设 施方面的优势,以及环境对混和通信网络的影响;文 献[11]提出使用电力线通信与无线通信双接口中继 模块,完成对2种通信方式的融合,并验证了混合通 信网络的容量和可靠性优于任何单一网络;文献 [12]构建了混合电力线通信 / 无线通信系统,对所 有节点都配备了电力线通信和无线功能,数据信息 在电力线通信与无线2条链路上并行传输,从而降 低了网络的中断概率,并通过蒙特卡罗方法对系统 进行验证;文献[13]使用电力线通信来协助无线通 信,其使用电力线通信来初始化和同步无线放大 转发中继以及在中继之间的广播信息,节省了无 线中继之间通信所产生的开销,有效地提高了网络 性能;文献[14]提出了用于信息感知和链路选择决 策的虚拟介质访问控制(MAC)层,用以实现电力线 通信与无线网络的融合,然而电力线通信MAC层与 无线通信MAC层需要周期性地向虚拟MAC层汇报 信道状态信息,增加了大量的信令开销,影响了通信 网络的高效性。以上研究都只是在某一层面实现电 力线通信与无线通信的融合,本文提出一种面向电 力物联网信息感知层面的构建低压电力线与微功 率无线通信跨层融合网络CPW(Cross layer fusion network of low voltage Power line and micro power Wireless communication)的方法,从CPW的MAC层、 网络层和业务层3个方面进行考虑,设计CPW的通 信协议、组网方案以及业物流分配策略,实现低压电 力线与微功率无线通信的深度融合,以保障电力物 联网在网络层面通信的高覆盖性和可靠性。

1 CPW的拓扑结构

电力物联网覆盖了大量的电力设备和传感器节点,这些节点可以通过低压电力线或微功率无线通信方式接入网络,附录中的图A1给出了一种CPW的拓扑结构示例。

由于模拟信号在信道上的衰减等因素,在源节 点与目的节点之间的距离超过最大通信距离的情况 下,低压电力线或微功率无线通信的范围不能保证 信号可以得到有效可靠的传输,需要通过建立中继 节点的方式进行通信。图A1中的节点3、5、7、8为 中继节点,通过接收信号并进行中继转发的方式,使 中心节点可以与节点1、2、4、6、9、10进行通信。由 于节点6与节点7之间存在建筑物,节点9与节点7 之间存在遮挡障碍,所以无线通信方式无法使用,中 继节点7只能通过电力线通信方式与节点6、节点9 连接;由于节点1与节点3之间存在电力线载波噪声 源,导致两节点间不具备载波通信功能,所以电力线 通信方式无法使用,中继节点3只能通过无线通信 方式与节点1和节点2连接。由图A1可知,如果采 用单一的通信方式,则中心节点无法建立与所有节 点连接的完整通信网络。本文提出的低压电力线与 微功率无线通信跨层融合方法不但能提高网络的节 点接入率,而且相比电力线与无线双模或级联通信 网络而言,能对业务提供更好的通信服务质量,有利 于保障电力物联网信息感知层面的有效性和可 靠性。

2 低压电力线与微功率无线通信跨层融合 原理

2.1 低压电力线与微功率无线通信在 MAC 层的 融合

本文参考电力线通信的 PRIME 协议^[15]与无线 通信的 IEEE 802.15.4 标准^[16],设计了 CPW 的 MAC 层通信协议。

2.1.1 CPW 的 MAC 层信道接入方式

为了避免传输冲突以及提高通信可靠性,CPW的MAC层采用带有冲突避免的载波侦听多路访问CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoid)和时分多址TDMA(Time Division Multiple Access)这2种信道接入技术,CPW将时间

划分为若干个信标周期,其具体的时隙划分如图1 所示。

			信标周期		
- 信标时隙	竞争接	人时隙	非竞争接入时隙	绉	[▶] [▶] 定CSMA/CA时隙
	*************		***********************		
电力线	无线信	电力约	戋 CSMA / CA 时降		电力线 TDMA 时隙
信标时隙	标时隙	无线	CSMA/CA 时隙		无线 TDMA 时隙

图1 信标周期的时隙划分

Fig.1 Time slot division of beacon period

图1中,信标帧从信标周期的起始位置开始发送,通过发送组网信标可以实现各节点之间网络时间与信息的同步;在信标周期的竞争接入时隙,中心节点与其他子节点通过CSMA/CA方式接入信道,完成CPW组网以及数据传输;在信标周期的非竞争接入时隙,节点通过TDMA方式接入信道,传输某个具有选择优先级的业务;在绑定CSMA/CA时隙中,具有某种特殊属性的节点通过竞争的方式接入信道。由图1可知,CPW中低压电力线和微功率无线通信的信标周期具有相同的时隙划分,为CPW的网络层融合提供了基础支撑。

2.1.2 CPW的MAC层标准数据帧格式设计

本文采用对 CPW 进行最优路径组网的方式,实现低压电力线与微功率无线通信在网络层的融合,网络层的通信必须要得到 MAC 层的支持。结合CPW 组网的需求,设计 MAC 层标准数据帧格式如图 2所示。

头 制码 类型 点 节点 路由表 需求因子 长度 域 校验 尾	帧	帧控	网络	源节	目的	中继	误码率	数据	数据	CRC	帧
	头	制码	类型	点	节点	路由表	需求因子	长度	域	校验	尾

图2 标准数据帧格式

Fig.2 Standard data frame format

图 2 中, 帧头和帧尾分别标识数据帧的起始和 结束; 帧控制码用于标识数据帧的种类; 网络类型标 识数据帧的传输网络; 源节点和目的节点分别为数 据发送和接收节点的编号; 中继路由表记录源节点 与目的节点之间所经过的中继节点编号; 误码率需求 因子表示业务的服务质量 QoS(Quality of Service) 需求; 数据长度与数据域用于标识待发送数据的信 息; CRC 校验负责校验所有字节的数据。

2.2 低压电力线与微功率无线通信在网络层的融合 原理

2.2.1 CPW的通信路径服务质量参数

为了使中心节点能与其他子节点进行有效可靠 的通信,在网络层实现低压电力线与微功率无线通 信的融合,需要选择最优中继路由,构建每个子节点 与中心节点的最优通信路径。在 CPW 的通信网络 中,通常利用时延、通信速率、误码率等参数评价网 络性能,从源节点到目的节点的通信路径可能存在 多个中继节点,中继节点的个数称为路由跳数,这些 因素决定了所选择的通信路径是否为最优通信路 径。所以选用时延、误码率、通信速率、路由跳数作 为CPW的服务质量评价参数。

利用图论知识将通信网络拓扑用图G(V, E)表示,其中,点集 $V(G) = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示通信网络中的节点集合,边集 $E(G) = \{e_{i,j}, e_{i,j}, \dots, e_{n-1,n}\}$ 表示网络中的通信链路集合,图G(V, E)中边集的权值为低压电力线通信链路与微功率无线通信链路的时延、误码率、通信速率和路由跳数。设一条完整的通信路径为 $R(v_s, v_d)$,路径共有n个节点,起始节点为 v_s ,目的节点为 v_a ,则通信路径 $R(v_s, v_d)$ 的服务质量参数如式(1)所示。

$$\begin{cases} D_{N} \Big[R \Big(v_{s}, v_{d} \Big) \Big] = \sum_{i=1}^{n-1} D_{N} \Big(e_{i,j} \Big) \\ E_{N} \Big[R \Big(v_{s}, v_{d} \Big) \Big] = 1 - \prod_{i=1}^{n-1} \Big[1 - E_{N} \Big(e_{i,j} \Big) \Big] \\ B_{N} \Big[R \Big(v_{s}, v_{d} \Big) \Big] = \min \Big\{ B_{N} \Big(e_{i,j} \Big) \Big\} \\ H_{N} \Big[R \Big(v_{s}, v_{d} \Big) \Big] = n - 2 \\ \text{s.t.} \quad n \ge 2, \ N = P, W, C, \ j = i + 1 \end{cases}$$
(1)

其中,N取P、W、C时,分别对应低压电力线通信网络、 微功率无线通信网络、CPW;N=P时, $D_{\rm P}[R(v_{\rm s},v_{\rm d})]$ 、 $E_{\rm P}[R(v_{\rm s},v_{\rm d})]$ 、 $B_{\rm P}[R(v_{\rm s},v_{\rm d})]$ 、 $H_{\rm P}[R(v_{\rm s},v_{\rm d})]$ 分别为低压 电力线通信网络的 $R(v_{\rm s},v_{\rm d})$ 的时延、误码率、通信速 率、路由跳数, $D_{\rm P}(e_{i,j})$ 、 $E_{\rm P}(e_{i,j})$ 、 $B_{\rm P}(e_{i,j})$ 分别为边 $e_{i,j}$ 权 值中低压电力线通信链路的时延、误码率、通信速 率,N=W和N=C时的参数定义依此类推。

选择最优路由的问题,本质上是求解一条满足服务质量约束的最优通信路径,使源节点与目的节点之间的通信质量最优。可通过构造通信路径评价函数,将选择最佳传输路径的问题转换为求解集合 *E*(*G*)的子集*E*₀,集合*E*₀为在满足一定参数约束的条件下,使目标函数取值最优的边集。

2.2.2 CPW中的最优通信路径模型

将时延、误码率、通信速率、路由跳数这4个参数作为评价通信路径质量的评价参数,从而建立评价 CPW 通信路径优劣的代价函数 $S_{c}[R(v_{s}, v_{d})]$ 如式 (2)所示。

$$S_{\rm C} \Big[R \big(v_{\rm s}, v_{\rm d} \big) \Big] = \Big\{ f_{\rm d} D_{\rm C} \Big[R \big(v_{\rm s}, v_{\rm d} \big) \Big] + f_{\rm e} E_{\rm C} \Big[R \big(v_{\rm s}, v_{\rm d} \big) \Big] + f_{\rm h} \Big\{ H_{\rm C} \Big[R \big(v_{\rm s}, v_{\rm d} \big) \Big] + 1 \Big\} \Big\} / \Big(f_{\rm h} B_{\rm C} \Big[R \big(v_{\rm s}, v_{\rm d} \big) \Big] \Big)$$

$$(2)$$

其中,*f*_a、*f*_b、*f*_b分别为时延、误码率、通信速率、路由跳数在代价函数中的比重系数。

由于通信网络服务质量参数的单位以及取值的 数量级各异,不能直接通过比重系数体现各参数的 重要程度。本文提出了一种平衡参数间数值差异性 的方法来解决上述问题,定义时延权重 γ_{d} 、误码率权 重 γ_{e} 、带宽权重 γ_{b} 和路由跳数权重 γ_{b} 如式(3)所示, 其通过简单的比例系数直观地反映各参数的重要 程度。



其中, D_{Cavg} 为 CPW 中两节点间的平均时延; E_{Cavg} 为 CPW 中两节点间的平均误码率; B_{Cavg} 为 CPW 中两节 点间的平均通信速率; H_{Cmax} 为 CPW 中两节点间的通 信路径最大路由跳数。

综合式(1)—(3)可知,可以采用式(4)、式(5)描述寻找由节点v_s到v_d满足服务质量约束的最优通信路径问题。

$$\min \left\{ S_{c} \left[R\left(v_{s}, v_{d}\right) \right] \right\} \quad v_{s}, v_{d} \in V(G)$$

$$s.t. \begin{cases} D_{c} \left[R\left(v_{s}, v_{d}\right) \right] \leq D_{max} \\ E_{c} \left[R\left(v_{s}, v_{d}\right) \right] \leq E_{max} \\ B_{c} \left[R\left(v_{s}, v_{d}\right) \right] \geq B_{min} \\ H_{c} \left[R\left(v_{s}, v_{d}\right) \right] \leq H_{max} \end{cases}$$
(5)

其中, D_{max} 为通信路径的最大时延; E_{max} 为通信路径的最大误码率; B_{min} 为通信路径的最小通信速率; H_{max} 为通信路径的最大路由跳数。

中心节点通过建立与其他所有节点的最优通信 路径,组建成一个通信质量最优的低压电力线与微 功率无线通信的融合网络。

2.2.3 改进蚁群算法基本原理

本文的研究目的是保障电力物联网在信息感知 层面上的广泛互联,其实际应用场景是大规模网络, 可以选用改进蚁群算法。针对低压电力线与微功率 无线通信跨层融合中的组网问题,本文提出了一种 结合布朗运动与局部收敛次数控制的改进蚁群算法 ABL(improved Ant colony algorithm controlled by Brownian motion and Local convergence number)。

蚁群算法是一种启发式算法,模仿蚂蚁在寻找

食物时选择路径的行为,可以用来寻找最优化路径^[17]。蚁群对信息素具有感知能力,它们会选择信息素浓度较高的路径并在所经路径上释放信息素,这种正反馈的机制促成了蚁群算法最优路径的选择。蚁群算法适用于解决在图*G(V,E)*中寻找最优路径的问题,但是其本身的正反馈机制使算法易收敛于局部最优解,这种局部收敛的现象降低了该算法的全局搜索能力。

150

布朗运动描述了微粒被分子撞击产生不规则运动的现象,是由植物学家布朗在观察花粉颗粒在水溶液中的无规则运动时发现的^[18]。如果实随机过程 {*B*(*t*),*t*≥0}是独立增量过程且满足式(6)所示的条 件,则称{*B*(*t*),*t*≥0}是一个标准的布朗运动^[19]。

$$\begin{cases} B(0)=0\\ (B(t)-B(s)) \sim N(0, t-s) \quad 0 \le s < t \end{cases}$$
(6)

其中,N(0,t-s)表示均值和方差分别为0和t-s的正态分布。

根据式(6)可以看出,布朗运动下一时刻的值只 与当前时刻的值有关,其为一种马尔可夫过程。作 为一种质点热运动,布朗运动的直接影响因素是粒 子体积与温度,粒子越小、温度越高则布朗运动越 激烈。

本文将布朗运动特性引入蚂蚁所经路径信息素 更新的过程中。在最大迭代次数为T_{max}的蚁群算法 中,如果连续出现T_{local}次迭代结果相同,则算法可能 处于局部收敛状态,本文将T_{local}称为局部收敛次数。 定义信息素布朗运动的影响因素为蚁群算法的迭代 次数和局部收敛次数,在算法初期蚁群信息素的更 新几乎不受布朗运动的影响;随着迭代次数的增加 或者出现局部收敛的现象,利用信息素的布朗运动 随机调整信息素分布,有利于算法跳出局部最优解, 增强其全局搜索能力;最后当迭代次数足够大时,再 减弱信息素的布朗运动,从而加快算法收敛的速度。

ABL结合布朗运动与局部收敛次数,动态控制 蚁群所经路径的信息素更新,以改善算法易陷入局 部最优解的问题。

2.2.4 ABL的路径搜索原理

ABL采用类似蚁群算法的寻优方式,通过迭代 选择最优路径与更新信息素,得到稳定的信息素浓 度最大的路径,即为最优路径。

假设蚂蚁能感知通信链路的服务质量参数,每 只蚂蚁从源节点出发,优先选择通信速率较高且时 延、误码率较低的通信链路。结合节点间最大通信 距离与服务质量约束条件,找出n个待选节点并计 算选择各待选节点的概率,具体计算方法如式(7)、 式(8)所示。

$$\begin{cases} P(e_{i,j}) = \begin{cases} \frac{\left(\tau\left(e_{i,j}\right)\right)^{\alpha} \left(\eta\left(e_{i,j}\right)\right)^{\beta}}{\sum_{\substack{j \in A_{\text{select}}}} \left(\tau\left(e_{i,j}\right)\right)^{\alpha} \left(\eta\left(e_{i,j}\right)\right)^{\beta}} & j \in A_{\text{select}} \\ \end{cases} \\ \begin{cases} P(e_{i,j}) = \frac{f_{\eta_{b}}B_{c}\left(e_{i,j}\right)}{f_{\eta_{d}}D_{c}\left(e_{i,j}\right) + f_{\eta_{c}}E_{c}\left(e_{i,j}\right)} \\ \\ f_{\eta_{b}} = \gamma_{b}D_{\text{Cavg}}E_{\text{Cavg}} \\ \\ f_{\eta_{e}} = \gamma_{e}D_{\text{Cavg}}B_{\text{Cavg}} \end{cases}$$
(8)

其中, $P(e_{i,j})$ 为节点j被选择的概率; $\tau(e_{i,j})$ 为路径 $e_{i,j}$ 上信息素的浓度; $\eta(e_{i,j})$ 为路径 $e_{i,j}$ 上的启发信息; α 和 β 分别为信息素的影响系数和启发信息的影响系数; A_{seleet} 为n个待选节点的集合。由式(7)可知,通信链路上的信息素浓度越大、通信服务质量越好,则待选节点被选择的概率也越大。

每只蚂蚁根据当前节点与待选节点之间的转移 概率,以轮盘赌的方式选择节点,直至找到目的节点 或者由于其他原因而退出。所有蚂蚁搜索完毕后, 以路径代价函数值为标准,统计得出最优路径和次 优路径,走过最优路径的蚂蚁释放信息素以加强该 路径被选择的概率,这种正反馈机制的信息素更新 如式(9)所示。

$$\begin{cases} \tau \left(v_{s}, v_{d} \right) = \left(1 - \rho \right) \tau \left(v_{s}, v_{d} \right) + \Delta \tau \left(v_{s}, v_{d} \right) \\ \Delta \tau \left(v_{s}, v_{d} \right) = \frac{Q}{S_{c} \left[R \left(v_{s}, v_{d} \right) \right]} \end{cases}$$
(9)

其中, $\tau(v_s, v_d)$ 为一个向量,其包含了最优通信路径 所经过节点的信息素; $\Delta \tau(v_s, v_d)$ 为信息素变量; ρ 、Q分别为信息素的挥发系数、强度系数。经过信息素 更新,在通信质量较好的通信路径上,其相应的信息 素浓度变大。为增强ABL的性能,根据迭代次数和 局部收敛次数对算法的信息素挥发系数进行自适应 调节,如式(10)所示。

$$\rho = \begin{cases} \max\left\{\rho_{0}\sqrt{T_{\text{local}}/T}, \rho_{\text{min}}\right\} & 0 < T \leq \frac{T_{\text{max}}}{3} \\ \min\left\{\rho_{0}\left(T_{\text{local}} + T\right)/T, \rho_{\text{max}}\right\} & \frac{T_{\text{max}}}{3} < T \leq \frac{2T_{\text{max}}}{3} \\ \max\left\{\rho_{0}T_{\text{local}}/T, \rho_{\text{min}}\right\} & \frac{2T_{\text{max}}}{3} < T \leq T_{\text{max}} \end{cases} \end{cases}$$
(10)

其中,T为迭代次数; ρ_0 为信息素挥发系数的初始 值; ρ_{\min} 、 ρ_{\max} 分别为信息素挥发系数的最小值、最大 值。由式(10)可知,在算法的迭代前期和后期,信息 素挥发系数较小,有利于算法的快速收敛,在迭代中 期信息素挥发系数较大,有利于增强算法的全局搜 索能力。

设蚂蚁所经最优路径为 $R(v_s, v_d)$,其信息素向量 为 $\tau(v_s, v_d)$ 。对 $\tau(v_s, v_d)$ 进行布朗运动信息素更新, 有利于ABL跳出局部最优解,如式(11)所示。 $\tau(v_s, v_d) =$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau}'(\boldsymbol{v}_{s},\boldsymbol{v}_{d}) + \delta \boldsymbol{u}(l)\sqrt{T_{\text{local}}/T} & 0 < T \leq \frac{T_{\text{max}}}{3} \\ \boldsymbol{\tau}'(\boldsymbol{v}_{s},\boldsymbol{v}_{d}) + \delta \boldsymbol{u}(l)(T_{\text{local}} + T)/T & \frac{T_{\text{max}}}{3} < T \leq \frac{2T_{\text{max}}}{3} \\ \boldsymbol{\tau}'(\boldsymbol{v}_{s},\boldsymbol{v}_{d}) + \delta \boldsymbol{u}(l)T_{\text{local}}/T & \frac{2T_{\text{max}}}{3} < T \leq T_{\text{max}} \end{cases}$$

$$(11)$$

其中, $\tau'(v_s, v_d)$ 为更新前的信息素向量; δ 为布朗运动的步长参数;u(l)为长度为l的随机数向量,其中的元素符合标准正态分布。

完成以上步骤后,清空蚂蚁经过的节点禁忌表, 本次迭代过程结束,经过多次迭代可以得出源节点 到目的节点的最优通信路径。中心节点对其他所有 节点实施上述路径搜索方法,建立各节点与中心节 点之间的最优通信路径,完成对 CPW 的组网过程及 网络动态维护,即在网络层实现低压电力线与微功 率无线通信的融合。

2.3 低压电力线与微功率无线通信在业务层的融合 原理

CPW 具有丰富的网络资源,合理分配业务流有 利于保障网络的高效性与可靠性。在CPW 中,低压 电力线与微功率无线通信具有相同的 MAC 层协议, 所以可以将2种通信信道看作融合网络的子信道, 源节点可以将要传输的业务数据分配为2个子业务 流,分别在2种通信网络中传输,目的节点将收到的 子业务流合并,即完成了源节点与目的节点通过融 合网络的数据传输。CPW 的子业务流分配原理及 过程如附录中的图 A2 所示。

在CPW的业务层进行子业务流分配,可以实现 低压电力线与微功率无线通信网络的深度融合,有 利于实现低压电力线与微功率无线通信之间的负载 平衡。如果两通信网络之间负载差异过大,可能会 导致其中某一通信网络的数据流量过大、网络负荷 过重的问题,使传输延迟增加;且当某一种通信方式 的信道质量发生突变时,对混合网络整体通信质量 的影响较大,维护低压电力线与微功率无线通信网 络之间的负载平衡可以增强混合通信网络的抗毁 性。对于融合网络而言,其通信链路的时延与通信 速率已经确定,子业务流的分配与链路的误码率相 关。如果总是优先选择误码率最小的通信方式,虽 然可以获得较低的误码率,但是可能引起2个通信 网络间负载不均衡的情况,不利于网络的稳定可持 续运行。为了综合考虑网络间负载均衡与不同业务的误码率需求,本文提出一种业务误码率需求因子,作用于 CPW 的网络业务层的子业务流分配过程。 假设每个节点都可采用电力线通信和无线通信,则 CPW 中2个相邻的节点间的服务质量参数见式(12)。

$$\begin{cases} D_{\rm C}(e_{i,j}) = \max\left\{ D_{\rm P}(e_{i,j}), D_{\rm W}(e_{i,j}) \right\} \\ B_{\rm C}(e_{i,j}) = B_{\rm P}(e_{i,j}) + B_{\rm W}(e_{i,j}) \\ E_{\rm C}(e_{i,j}) = E_{X}(e_{i,j}) C_{X} + E_{Y}(e_{i,j}) C_{Y} \\ E_{X}(e_{i,j}) = \min\left\{ E_{\rm P}(e_{i,j}), E_{\rm W}(e_{i,j}) \right\} \\ E_{Y}(e_{i,j}) = \max\left\{ E_{\rm P}(e_{i,j}), E_{\rm W}(e_{i,j}) \right\} \\ C_{X} = \frac{B_{X}(e_{i,j}) + B_{Y}(e_{i,j}) I}{B_{X}(e_{i,j}) + B_{Y}(e_{i,j})} \\ C_{Y} = \frac{B_{Y}(e_{i,j}) - B_{Y}(e_{i,j}) I}{B_{X}(e_{i,j}) + B_{Y}(e_{i,j})} \\ I_{\max} = \min\left\{ \frac{\left(B_{X}(e_{i,j}) + B_{Y}(e_{i,j}) - Z_{\rm b} \right) B_{X}(e_{i,j})}{Z_{\rm b} B_{Y}(e_{i,j})}, 1 \right\} \\ 0 < Z_{\rm b} \leq B_{X}(e_{i,j}) + B_{Y}(e_{i,j}) \\ \left\{ X = {\rm P}, Y = {\rm W} \quad E_{\rm P}(e_{i,j}) > E_{\rm W}(e_{i,j}) \\ X = {\rm W}, Y = {\rm P} \quad E_{\rm P}(e_{i,j}) > E_{\rm W}(e_{i,j}) \end{cases}$$

其中, C_x 、 C_y 分别为子业务流在通信网络X、Y中所占的比重; $B_x(e_{i,j})$ 、 $B_y(e_{i,j})$ 分别为通信网络X、Y在 $e_{i,j}$ 的通信速率;I为业务Z的误码率需求因子, I_{max} 为其最大值; Z_b 为传输业务Z所需要的通信速率。由式(12)可知,业务的误码率需求因子与CPW节点间的误码率和网络间的负载均衡有关,对于不同服务质量需求的业务,可以设置相应的误码率需求因子,以兼顾用户服务质量需求和负载的平衡性,有效提升网络性能。

综上可知,本文通过在 CPW 的 MAC 层的统一 通信协议设计、网络层的最优通信路径组网、业务层 对子业务流的合理分配策略,完成了面向电力物联 网信息感知层面的低压电力线与微功率无线通信的 跨层融合,如图3所示。



3 CPW 跨层融合实现过程

3.1 路由表设计

在组网过程中,ABL通过节点间路径的信息素浓度选择中继节点,根据代价函数值选择最优通信路径。假设通信节点可以通过数据传输感知链路间的信道状态信息,将低压电力线与微功率无线通信链路的服务质量参数存储在相应的路由表中。设立节点v_s的电力线通信路由表和无线通信路由表分别如表1、2所示。

表1 电力线通信路由表

Table 1 Routing table of power line communication

路由节点	时延	误码率	通信速率	信息素
v_1	$D_{\mathrm{P}}(e_{\mathrm{s},1})$	$E_{\mathrm{P}}(e_{\mathrm{s},1})$	$B_{\rm P}(e_{\rm s,1})$	$\tau(e_{\rm s,1})$
v_2	$D_{\mathrm{P}}(e_{\mathrm{s},2})$	$E_{\mathrm{P}}(e_{\mathrm{s},2})$	$B_{\mathrm{p}}(e_{\mathrm{s},2})$	$\tau(e_{\mathrm{s},2})$
:	:	:	:	:
v_k	$D_{\mathrm{P}}(e_{\mathrm{s},k})$	$E_{\mathrm{P}}(e_{\mathrm{s},k})$	$B_{\mathrm{P}}(e_{\mathrm{s},k})$	$ au(e_{\mathrm{s},k})$

表2 无线通信路由表

Table 2	Routing	table	of	wireless	communication

路由节点	时延	误码率	通信速率	信息素
v_1	$D_{\rm W}(e_{\rm s,1})$	$E_{\rm W}(e_{\rm s,1})$	$B_{\rm W}(e_{\rm s,1})$	$\tau(e_{\rm s,1})$
v_2	$D_{\rm W}(e_{\rm s,2})$	$E_{\rm W}(e_{\rm s,2})$	$B_{\rm W}(e_{\rm s,2})$	$\tau(e_{\mathrm{s},2})$
:	:	:	:	:
v_k	$D_{\rm W}(e_{{\rm s},k})$	$E_{\rm W}(e_{{\rm s},k})$	$B_{\rm W}(e_{{\rm s},k})$	$ au(e_{\mathrm{s},k})$

3.2 CPW的跨层融合过程

CPW的跨层融合过程是以建立其统一的MAC 层通信协议为基础,以网络层的最优通信路径搜索 组网为途经,以业务层考虑负载均衡与业务服务质 量需求的子业务流分配为深化,实现低压电力线与 微功率无线通信的深度融合,具体步骤如下。

(1)如果中心节点 v_s未存储其到节点 v_a的通信 路径或原有通信路径失效,则在信标周期的开始时 刻,v_s生成对节点 v_a的组网信标帧,并将其分别通过 电力线与无线通信网络进行发送。

(2)节点v_i收到组网信标帧后,将v_s到v_i的服务 质量参数进行存储,更新相应的路由表数据。综合 服务质量参数条件,决定v_i是否成为v_s的中继节点, 如果符合约束条件,则在数据域的禁忌表中写入v_i, 通过2种通信网络向v_s发送入网请求帧并转发组网 信标帧。

(3)v_s收到入网请求帧后更新电力线通信路由 表和无线通信路由表。

(4)节点v_i收到v_i转发的组网信标帧,记录从节 点v_i到v_i的信道状态信息,更新相应的路由表。综合 服务质量参数条件,决定v_i是否成为v_i的中继节点, 如果符合约束条件,则在数据域的禁忌表中写入v_i, 通过2种通信方式向v_i发送入网请求帧并转发组网 信标帧。 (5)重复步骤(2)一(4),直至找到目的节点v_d。 v_d根据收到的不同组网信标帧,选择最优通信路径 并对路径的信息素进行更新,向节点v_s发送用于更 新信息素的响应帧。

(6)重复步骤(1)—(5)直至达到最大迭代次数,找出由节点v_a到节点v_a的最优通信路径和次优通信路径。

(7) v_s对其他所有节点重复步骤(6),直至完成 对CPW的组网。

(8)当最优和次优通信路径均失效时,中心节点 v_s经过原最优通信路径向v_a发送路由重构试探帧,原 中继节点向v_s返回路由重构响应帧,找出失效节点 并重构最优通信路径。

(9) 在完成对 CPW 的组网与维护之后,对于具 有不同服务质量需求的业务,进行子业务流分配传 输,实现低压电力线与微功率无线通信在业务层的 融合。

4 仿真结果与分析

4.1 前提与假设

为了便于验证本文所提出的通信融合方法,以 以下假设条件为前提进行仿真实验。

(1)每个节点接收数据包后都能计算其与上一 个节点之间的通信速率、时延、误码率,并将它们存 储在相应的路由表中。

(2)所有节点中都配有低压电力线 / 微功率无 线混合通信模块,混合通信模块可以根据业务的误 码率需求因子,调整在低压电力线与微功率无线通 信网络中的业务量比例。

(3)融合网络中的数据传输会带来额外的传输 抖动问题,为了解决这一实际问题,需要首先设置2 个发送缓冲区,将发送数据分别发送到2个缓冲区 中进行缓冲,以确保发送同步。同理,在目的接收节 点处,也要设置2个接收缓冲区,将接收到的2路数 据码流分别存放在对应的接收缓冲区中,待缓冲区 数据达到半满时,再同步合成数据码流。通过设置 合适的接收缓冲区大小,动态调整2个通道的接收 时延,达到克服传输抖动问题的目的。引入接收缓 冲区,会带来额外的附加时延。针对此问题,本文在 融合网络数据传输过程中设置了相应的用于消除传 输抖动问题的数据缓冲延时。

4.2 参数设置

参考文献[20-22],低压电力线与微功率无线 通信网络中任意两点间的时延分别设置为服从区间 为[2×10⁻³,8×10⁻³] s和服从区间为[1×10⁻³,7×10⁻³] s 的均匀分布;数据缓冲延时服从区间为[1×10⁻⁴, 2×10⁻⁴] s的均匀分布;误码率分别设为服从均值

152

为6×10-5、方差为2×10-5和服从均值为7×10-5、方差 为3×10⁻⁵的正态分布;通信速率分别设为服从均值 为 200 kbit / s、方差为 3 (kbit / s)² 和服从均值为 200 kbit / s、方差为5(kbit / s)²的正态分布。仿真 环境为在500m×600m的范围内分布了67个通信 节点,其中有1个中心节点和66个子节点。所有节 点中都配有低压电力线 / 微功率无线混合通信模 块, 且网络中所需传输的业务对时延和通信速率要 求较高。在有建筑物和障碍物遮挡的情况下,为模 拟低压电力线通信和微功率无线通信的信号衰减, 将节点间最大通信距离范围设为85~95 m,仿真软 件为MATLAB2016。对于时延和通信速率要求较高 的服务,算法中的其他参数设置如附录中的表A1所 示,其中时延、误码率、通信速率和路由跳数权重的 设置是为了验证算法的有效性,具体应用时可根据 实际情况进行调整。

4.3 仿真分析

4.3.1 ABL的有效性验证

(1)ABL与蚁群算法性能对比。

本文结合布朗运动特性和局部收敛次数对蚁群 算法的影响,提出了ABL,通过组网实现CPW在网 络层的融合。为验证ABL的性能,将蚁群算法作为 对比算法,在CPW中令中心节点与其他所有节点建 立最优通信路径,分别统计2种算法收敛所需的平 均迭代次数和所有节点最优通信路径的平均代价函 数值,如表3所示。

表3 ABL与蚁群算法性能对比

 Table 3
 Performance comparison between ABL

and	ant	colony	algorithm	

算法	算法收敛的 平均迭代次数	最优通信路径的 平均代价函数值
ABL	14.476	0.852
蚁群算法	8.865	0.915

由表3可知,ABL收敛所需的迭代次数比蚁群 算法多,相应的平均代价函数值相对蚁群算法有所 降低,即ABL寻找最优通信路径的通信服务质量优 于蚁群算法寻找的路径。这说明蚁群算法易陷入局 部最优解,ABL比蚁群算法具有更好的全局搜索能 力,能够完成中心节点对其他所有节点的组网工作, 性能优于蚁群算法。

(2)ABL与无线自组网按需平面距离向量路由 算法性能对比。

无线自组网按需平面距离向量路由AODV(Ad hoc On-demand Distance Vector routing)算法是一种应用于无线自组网的典型路由算法。在CPW中令中心节点与其他所有节点建立最优通信路径,得出每个节点最优通信路径的代价函数值。图4为基

于2种算法的各节点最优通信路径代价函数值的 比较。



代价函数值 Fig.4 Cost function values of optimal communication

path for all nodes in ABL and AODV algorithm

由图4可知,部分节点使用ABL寻找的最优通 信路径代价函数值低于使用AODV算法寻找的最优 通信路径代价函数值,另一部分节点使用2种算法 寻找的最优通信路径相同,所以ABL的综合性能优 于AODV算法。

(3)ABL针对不同服务质量类型的路由搜索 验证。

ABL可以根据不同的服务质量需求给出不同的 组网方案。部分业务,如语音与视频业务等对时延 和通信速率服务质量要求较高的业务,其服务质量 需求用S₁表示;部分业务,如文件传输业务等对误码 率要求较高的业务,其服务质量需求用S₂表示。通 过调整服务质量参数权重,可以搜索相应的最优通 信路径。对于S₁,设置 γ_d =0.3、 γ_e =0.2、 γ_b =0.4、 γ_b = 0.1,搜索得到节点1到节点67的最优通信路径为1-25-40-43-41-67,次优通信路径为1-25-24-43-41-67;对于S₂,设置 γ_d =0.1、 γ_e =0.5、 γ_b =0.1、 γ_b =0.1, 搜索得到节点1到节点67的最优通信路径为1-60-12-31-57-67,次优通信路径为1-60-12-31-41-67,其他参数值如表4所示。

表4 S₁与S₂的路径参数对比

Table 4 Comparison of path parameters between

 S_1 and S_2

服务质 量需求	通信 路径	时延∕s	误码率 / %	通信速率 / (kbit•s ⁻¹)	代价 函数值
S_1	最优	2.495×10 ⁻²	3.364×10 ⁻⁴	392.70	1.629
	次优	2.767×10^{-2}	3.137×10 ⁻⁴	398.10	1.663
S_2	最优	3.179×10 ⁻²	2.800×10 ⁻⁴	396.77	6.776
	次优	3.194×10^{-2}	2.817×10^{-4}	396.77	6.809

由表4可知, S_1 最优通信路径的时延比 S_2 的短, S_2 最优通信路径的误码率比 S_1 的低,验证了ABL可 以根据不同的服务质量需求搜索对应的最优通信路 径。同时可知 S_1 的最优路径通信速率比 S_2 的略低, 在需要时可以通过调整参数权重获得通信速率更高 的通信路径。需要指出的是,虽然 S_2 的最优通信路 径的代价函数值远大于 S_1 的最优通信路径的代价函 数值,但是不同服务质量参数权重设置下的代价函数值不具有可比性,最优通信路径都是在相对应的服务质量需求条件下搜索得到的。

4.3.2 CPW与单一通信方式的对比

为了比较CPW 和低压电力线通信网络、微功率 无线通信网络的性能,分别在3种网络搜索中心节 点对节点67的最优通信路径。3种网络的最优和次 优通信路径的服务质量参数以及代价函数值如表5 所示。

CPW最优通信路径为1-25-40-43-41-67,次优 通信路径为1-25-24-43-41-67;低压电力线通信网 络最优通信路径为1-60-4-30-58-67,次优通信路 径为1-60-4-42-57-67;微功率无线通信网络最优 通信路径为1-20-12-31-57-67,次优通信路径为1-20-12-31-41-67。3种网络的最优通信路径见图5。

由表5和图5可知,CPW的中心节点与节点67 之间最优通信路径的时延、误码率方面的性能均低 于单一通信方式网络,但是CPW的通信速率远大于 低压电力线或微功率无线通信网络,故其综合性能 优于任何单一通信网络。

4.3.3 CPW与双模通信方式的对比

将采用低压电力线与微功率无线通信互为备份的通信方式称为双模通信方式,双模通信网络在组网时,可以根据低压电力线和微功率无线通信链路的信道状态,选择较优的通信方式进行信息传输。分别在CPW与双模通信网络中,使中心节点对节点67搜索最优通信路径,其服务质量等参数如表6所示。双模通信方式的最优通信路径为1-20-12-31-57-67,次优通信路径为1-60-4-42-57-67。

双模通信网络中心节点对节点67的最优通信 路径与微功率无线通信最优路径相同,其次优通信 路径与低压电力线通信网络的次优通信路径相同。 由表5、6知,虽然通信路径一致,但是由于双模通信



Fig.5 Optimal communication paths of three communication networks

方式在所有链路均选择最优通信方式,故其通信路 径服务质量优于任何单一通信方式,所以只需将双 模通信网络对所有节点组网的性能与CPW进行 对比。

分别在 CPW 与双模通信网络中,令中心节点对 所有其他节点组网,得出每个节点最优通信路径的 代价函数值,如图6所示。

双模通信方式选择低压电力线或微功率无线通 信中最优的方式通信,而 CPW 需要兼顾低压电力线 与微功率无线2种通信方式的时延和误码率。由表 6和图6可知,双模通信网络中心节点对节点67最 优通信路径在时延、误码率方面均优于 CPW,但是 CPW 的通信速率远大于双模通信网络,其对所有节 点组网的最优通信路径的代价函数值均低于双模通 信网络,即其综合通信服务质量优于双模通信网络。 4.3.4 CPW 与级联通信方式的对比

当网络中某些节点只具备一种通信方式时,单 一通信方式的网络不能实现节点的全部接入,除 CPW 和双模通信网络外,级联方式的通信网络也能 完成节点的全部接入,故将级联通信网络作为CPW 的对比网络。设节点10、25、39可以使用低压电力

		表5 CPV	N与单	一通	信方式	网络邓	寸比	
Table 5	Comparison	between	CPW	and	single	mode	communication	network

网络	通信路径	时延∕s	误码率 / %	通信速率 / (kbit•s ⁻¹)	代价函数值
CPW	最优	2.495×10^{-2}	3.364×10^{-4}	392.70	1.629
	次优	2.767×10^{-2}	3.137×10^{-4}	398.10	1.663
任正由力化运信网络	最优	2.372×10 ⁻²	2.122×10^{-4}	192.08	2.847
似压电力线通信网络	次优	2.179×10^{-2}	2.770×10^{-4}	196.53	2.855
德山南王建国住网族	最优	1.391×10^{-2}	2.472×10^{-4}	195.71	2.236
佩切平儿线迪信网络	次优	1.822×10^{-2}	2.627×10^{-4}	201.10	2.510

表6 CPW与双模通信网络的对比

Table 6 Comparison between CPW and dual-mode communication network

							_
	网络	通信路径	时延/s	误码率 / %	通信速率 / (kbit•s ⁻¹)	代价函数值	
	CDW	最优	2.495×10 ⁻²	3.364×10 ⁻⁴	392.70	1.629	
	CPW	次优	2.767×10^{-2}	3.137×10^{-4}	398.10	1.663	
	四齿诵信网纹	最优	1.058×10^{-2}	2.593×10^{-4}	195.71	2.047	
	双楔迪信网络	次优	1.463×10^{-2}	2.812×10-4	195.84	2.391	



— CPW, — 双模通信网络

图 6 CPW 与双模通信网络的各节点的最优通信路径 代价函数值 Fig.6 Cost function values of optimal communication

第10期

2.50

1.25

代价函数值

path for all nodes in CPW and dual-mode communication network

线与微功率无线通信方式,若节点14、15、18、19、 22、23、35—38只采用微功率无线通信方式,其他节 点只采用低压电力线通信方式,则构成低压电力线 与微功率无线通信级联通信网络,如附录中的图A3 所示。通过路由搜索得出中心节点到节点15的最 优通信路径为1-25-38-14-15,次优通信路径为1-25-40-14-15;若节点14、15、18、19、22、23、35—38 只采用低压电力线通信方式,其他节点只采用微功 率无线通信方式,则构成微功率无线通信级联低压 电力线通信网络,如附录中的图A4所示。通过路由 搜索得出中心节点到节点15的最优通信路径为1-25-40-14-15,次优通信路径为1-10-38-14-15。

CPW的中心节点对节点15的最优通信路径为 1-25-40-14-15,次优通信路径为1-25-39-14-15, CPW和各级联通信网络的路径服务质量参数、代价 函数值等参数如表7所示。表中级联网络1、级联网 络2分别表示低压电力线与微功率无线通信级联通 信网络、微功率无线通信级联低压电力线通信网络。

由附录图 A3、附录图 A4 和表7可知,CPW 的中 心节点对节点 15 最优通信路径的时延比2种级联网 络对应的时延长,其误码率介于2种级联网络对应 的误码率之间;而 CPW 的通信速率远大于2种级联 网络的通信速率,路径最低代价函数值低于2种级联 网络的最低代价函数值,验证了 CPW 的通信服务 质量比级联网络优越。在以上仿真结果中,CPW 两 节点间最优通信路径的通信速率和时延均超过其他 网络类型,最优通信路径的误码率则与各服务质量 参数的权重有关。 4.3.5 考虑业务服务质量需求的业务流分配策略对 CPW 的影响

当节点1与节点16进行通信时,考虑负载均衡 与业务误码率需求因素,通过设置业务误码率需求 因子I对子业务流进行分配。设业务需要的通信速 率为 Z_b ,则 E_c 、 Z_b 、I之间的关系如图7所示。



图 7 E_c 、 Z_b 、I之间的关系 Fig.7 Relations among E_c , Z_b and I

当 Z_b =300 kbit/s时,查询得 $E_p(e_{1,16})$ =9.016×10⁻⁵、 $E_w(e_{1,16})$ =3.586×10⁻⁵、 $B_p(e_{1,16})$ =198.38 kbit/s、 $B_w(e_{1,16})$ = 201.66 kbit/s。由式(12)知误码率需求因子的最大 值 I_{max} =0.339,表8为当I取不同值时节点1与节点16 之间的传输误码率以及网络间负载信息。表中, E_c 为节点1与节点16之间的传输误码率; Z_p 、 Z_w 分别为 业务 Z_b 分配在低压电力线通信网络与微功率无线通 信网络子业务流的通信速率。

表8 / 对通信链路误码率及网络负载的影响

 Table 8
 Influence of I on error rate of communication

 link and network load

Ι	$Z_{\rm P}/({\rm kbit}\cdot{\rm s}^{-1})$	$Z_{\rm W}$ / (kbit • s ⁻¹)	$E_{\rm C}$	
0	148.77	151.23	6.279×10 ⁻⁵	
0.1	133.89	166.11	6.010×10 ⁻⁵	
0.2	119.02	180.98	5.740×10 ⁻⁵	
0.3	104.14	195.86	5.471×10 ⁻⁵	

由图7和表8可知,随着业务误码率需求因子的 逐渐增大,低压电力线通信网络与微功率无线通信 网络之间的负载差距增大,通信链路的误码率逐渐 降低。对误码率要求较低的业务可以用增高误码率 为代价来平衡网络负载;对误码率要求较高的业务 可以用降低网络负载均衡性为代价来减小误码率。 待传输业务可以根据其服务质量需求,设置相应的 业务误码率需求因子,以综合考虑业务通信服务质 量与网络间负载的均衡性。仿真结果表明,在业务

表7 CPW 与级联通信网络的比较

	Table / Compa	rison between	CPW and cascade	communication networks	
网络	通信路径	时延 / s	误码率 / %	通信速率/(kbit·s ⁻¹)	代价函数值
CPW	最优	1.733×10 ⁻²	2.247×10 ⁻⁴	392.70	1.144
	次优	1.931×10 ⁻²	1.885×10^{-4}	393.52	1.152
级联网络1	最优	1.315×10 ⁻²	1.367×10 ⁻⁴	192.06	1.767
	次优	1.427×10 ⁻²	1.801×10^{-4}	192.06	1.984
级联网络2	最优	1.315×10 ⁻²	2.688×10-4	195.79	2.149
	次优	1.467×10 ⁻²	2.495×10 ⁻⁴	194.59	2.206

层上的子业务流分配策略可以提升 CPW 的有效性 和可靠性,实现低压电力线与微功率无线通信网络 的深度融合。

5 结论

(1)提出低压电力线通信与微功率无线通信的 统一MAC协议,在CPW的MAC层实现2种通信方 式的融合,为低压电力线与微功率无线通信在网络 层的融合提供基础支持。

(2)为完成 CPW 的最优通信路径组网,提出 ABL算法,采用与局部收敛次数有关的布朗运动更 新信息素向量,有利于算法跳出局部最优解。仿真 结果表明,ABL算法比蚁群算法的全局搜索能力强, 不易陷入局部最优。

(3)针对子业务流分配时业务服务质量需求与 网络间负载均衡性的问题,提出业务误码率需求因 子,使用户在两者之间权衡时做出有利的选择。仿 真结果验证了误码率需求因子可以调节CPW的负 载均衡性和通信链路的误码率。

(4)通过对 CPW 的 MAC 层建立统一的通信协 议、网络层实现最优通信路径组网、业务层进行子业 务流分配,实现低压电力线通信与微功率无线通信 的跨层融合。仿真结果验证了该跨层融合网络的通 信服务质量优于其他对比网络。

本文提出的低压电力线通信与微功率无线通信 跨层融合方法,有利于提高电力线与无线通信融合 网络的覆盖范围及可靠性,为保障电力物联网的广 泛互联提供了一种备选的技术支持。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 王毅,陈启鑫,张宁,等. 5G通信与泛在电力物联网的融合:应用分析与研究展望[J]. 电网技术,2019,43(5):1575-1585.
 WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric internet of things: application analysis and research prospects [J]. Power System Technology,2019,43(5):1575-1585.
- [2] 谢小瑜,周俊煌,张勇军. 深度学习在泛在电力物联网中的应用与挑战[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):77-87.
 XIE Xiaoyu,ZHOU Junhuang,ZHANG Yongjun. Application and challenge of deep learning in Ubiquitous Power Internet of Things[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40 (4):77-87.
- [3] CANO C, PITTOLO A, MALONE D, et al. State of the art in power line communications: from the applications to the medium[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016,34(7):1935-1952.
- [4] 胡正伟, 贺冬梅, 谢志远. 面向电力线通信的 OFDM 符号定时 同步算法[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):144-150.
 HU Zhengwei, HE Dongmei, XIE Zhiyuan. OFDM symbol timing synchronization algorithm for PLC[J]. Electric Power Au-

tomation Equipment, 2019, 39(5):144-150.

- [5] RAYCHAUDHURI D, MANDAYAM N B. Frontiers of wireless and mobile communications[J]. Proceedings of the IEEE, 2012,100(4):824-840.
- [6] COSTA V L R D, FERNANDES V, RIBEIRO M V. Narrowband hybrid PLC/wireless: transceiver prototype, hardware resource usage and energy consumption [J]. Ad Hoc Networks, 2019,94:101945.
- [7] LAI S W, MESSIER G G. Using the wireless and PLC channels for diversity [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(12):3865-3875.
- [8] SINHA T, BHAUMIK J. Design of computationally efficient sharp FIR filter utilizing modified multistage FRM technique for wireless communications systems[J]. Journal of Electronic Science and Technology, 2019, 17(2):185-192.
- [9] DUBEY A, MALLIK R K, SCHOBER R. Performance analysis of a power line communication system employing selection combining in correlated log-normal channels and impulsive noise[J]. IET Communications, 2014, 8(7): 1072-1082.
- [10] DE DIB M B A L, FERNANDES V, DE FILOMENO M L, et al. Hybrid PLC / wireless communication for smart grids and Internet of Things applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2):655-667.
- [11] QIAN Y W, YAN J H, GUAN H B, et al. Design of hybrid wireless and power line sensor networks with dual-interface relay in IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(1): 239-249.
- [12] AHIADORMEY R K, ANOKYE P, JO H, et al. Performance analysis of two-way relaying in cooperative power line communications[J]. IEEE Access, 2019, 7:97264-97280.
- [13] KUHN M, BERGER S, HAMMERSTRÖM I, et al. Power line enhanced cooperative wireless communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(7):1401-1410.
- [14] 李建岐,安春燕,李欣. 基于虚拟 MAC 的电力线载波与无线融 合及业务分配策略研究[J]. 高电压技术,2019,45(6):1689-1696.

LI Jianqi, AN Chunyan, LI Xin. Research on virtual MACbased power lines and wireless communication network fusion and traffic allocation strategy[J]. High Voltage Engineering, 2019,45(6):1689-1696.

- [15] GONZALEZ-SOTRES L, MATEO C, FRIAS P, et al. Replicability analysis of PLC PRIME networks for smart metering applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(2): 827-835.
- [16] STANISLOWSKI D, VILAJOSANA X, WANG Q, et al. Adaptive synchronization in IEEE 802.15.4e networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1):795-802.
- [17] ABDELBAR A M, SALAMA K M. Parameter self-adaptation in an ant colony algorithm for continuous optimization[J]. IEEE Access, 2019, 7:18464-18479.
- [18] MO J, RAIZEN M G. Highly resolved Brownian motion inspace and in time[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2019,51(1):403-428.
- [19] CHEN Z Q,LOU S W. Brownian motion on some spaces with varying dimension[J]. The Annals of Probability, 2019, 47(1): 213-269.
- [20] 胡正伟,谢荣圆,谢志远. 基于QoS参数的电力线信道状态映 射方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):159-165.
 HU Zhengwei,XIE Rongyuan,XIE Zhiyuan. Mapping of PLC

channel status to QoS parameter[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):159-165.

- [21] AQEELURREHMAN, ABBASI A Z, ISLAM N, et al. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture [J]. Computer Standards & Interfaces, 2014, 36(2):263-270.
- [22] 何源,郑霄龙. 2.4 GHz无线网络共存技术研究进展[J]. 计算机研究与发展,2016,53(1):26-37.

HE Yuan, ZHENG Xiaolong. Research on wireless network coexistence at 2.4 GHz[J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53(1):26-37. 作者简介:



史建超(1989—),男,河北保定人,博 士研究生,主要研究方向为智能电网通信技 术(**E-mail**:sjcncepu@126.com);

谢志远(1964—),男,河北辛集人,教 授,博士,主要研究方向为电力线通信及智 能信息传感技术(E-mail:zhiyuanxie@263. net)。

史建超

(编辑 任思思)

Fusion method of low voltage power line and micro power wireless communication for information perception of Power Internet of Things

SHI Jianchao, XIE Zhiyuan

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to improve the coverage and reliability of the information perception layer of the Power Internet of Things, a method to establish the CPW (Cross layer fusion network of low voltage Power line and micro power Wireless communication) is proposed. Firstly, the unified MAC (Media Access Control) layer model of CPW is established to provide the basic support for the fusion of CPW network layer. Then, an improved ant colony algorithm controlled by Brownian motion and the number of local convergence is proposed to accomplish the networking process of CPW network. The sub-business of CPW network is allocated and the error rate requirement factor is proposed, which enables the cross-layer fusion of low voltage power line and micro power wireless communication networks. The simulative results show that the service quality of the communication link in the cross-layer fusion network is better than that of power line and wireless dual mode or cascade communication networks. Users can set corresponding error rate requirement factors according to different services to balance the quality of communication link and network load, so the efficiency and reliability of the CPW can be guaranteed.

Key words: Power Internet of Things; low voltage power line communication; micro power wireless communication; cross-layer fusion; ant colony algorithm



图A2 CPW业务流分配

Fig.A2 Sub-business allocation in CPW

表 A1 仿真参数设置

TableA1 Settings of simulation parameters

参数	取值	参数定义
m	15	每次迭代的蚂蚁数
$N_{ m max}$	70	最大迭代次数
α	0.1	信息素影响系数
β	0.3	启发信息影响系数
$ ho_0$	0.8	信息素挥发系数初始值
$ ho_{ m max}$	0.9	最大信息素挥发系数
$ ho_{ m min}$	0.1	最小信息素挥发系数
Q	30	信息素强度系数
δ	8	布朗运动步长参数
γd	0.3	时延权重
У́е	0.2	误码率权重
γь	0.4	通信速率权重
γ'n	0.1	路由跳数权重
$H_{ m max}$	10	最大路由跳数
D_{\max}	3.5×10^{-2} s	最大时延
$E_{ m max}$	4×10 ⁻⁴	最大误码率
B_{\min}	190kbit s ⁻¹	最小通信速率

附录





Fig.A3 Power line communication network connected with wireless communication network





Fig.A4 Wireless communication network connected with power line communication network